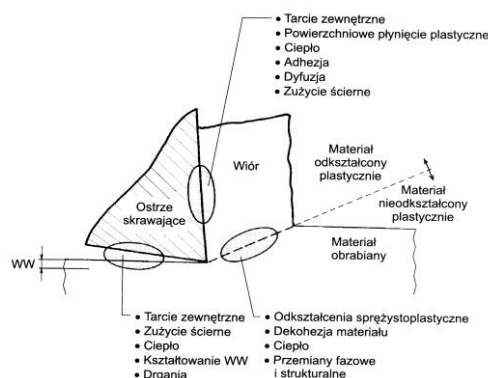


## ZJAWISKA FIZYKALNE W OBRÓBCE SKRAWANIEM

Obróbka skrawaniem odbywa się klinowym ostrzem narzędzia, które oddziela określoną warstwę materiału, powodując jej odkształcenie sprężyste i plastyczne oraz zamianę na wióry. W tym celu do strefy obróbki doprowadza się energię mechaniczną.

W rozleglejszym znaczeniu proces skrawania jest wynikiem wzajemnego oddziaływania poszczególnych elementów układu obróbkowego, a w szczególności obrabiarki (o), narzędzia (n) i obrabianego przedmiotu (p). Z tego względu dokładny opis zjawisk fizycznych występujących w procesie obróbki wymaga uwzględnienia kinematycznych i dynamicznych cech obrabiarki, stereometrii i właściwości materiału ostrza narzędzia oraz wymiarów, kształtu i właściwości fizykomechanicznych obrabianego materiału.



Rys. 12.1. Strefy intensywnych oddziaływań fizycznych w układzie narzędzie-przedmiot wg [4]

Uproszczony schemat oddziaływania ostrza na obrabiany materiał, w którym wyodrębniono trzy zasadnicze obszary wpływu, przedstawiono na rys.12.1.

Obejmują one:

- sprężyste i plastyczne odkształcenia materiału warstwy skrawanej, która jest przetwarzana na wióry,
- warunki i mechanizmy rozdzielania (dekohezji) materiału, tarcie wewnętrzne i tworzenie nowej, chemicznie czystej powierzchni,
- tarcie zewnętrzne w strefach kontaktu i będące jego skutkiem zużycie ostrza narzędzia,
- powstawanie ciepła i jego przepływ między składnikami układu obróbkowego.
- termodynamikę procesu, przemiany fazowe i strukturalne,
- oddziaływanie cieczy obróbkowych (chłodząco-smarujących) na przebieg i efekty technologiczne procesu skrawania,
- tworzenie struktury geometrycznej powierzchni i fizykalnego stanu WW.

## 5.1. PROCES TWORZENIA SIĘ WIÓRA

### 5.1.1. Strefa skrawania

**Strefą skrawania** nazywamy umownie obszar bezpośredniego oddziaływania narzędzia na przedmiot obrabiany, lub inaczej — obszar, w którym warstwa skrawana zamieniana jest w wiór. Występuje w niej bardziej złożony stan naprężeń i odkształceń, zależny od warunków skrawania. Ostrze działając na warstwę skrawaną, powoduje jej sprężyste, a następnie plastyczne odkształcenie wzdłuż tzw. strefy ścinania. W pewnym (z reguły niewielkim) uproszczeniu można tę strefę przybliżyć płaszczyzną ścinania. Warstwa skrawana po przejściu przez strefę ścinania zamieni się w wiór o strukturze wyraźnie ukierunkowanej przez to ścinanie. Oddziaływanie wióra i powierzchni natarcia jest także złożone. Znaczne siły normalne, wysoka temperatura, „idealna” czystość spodniej powierzchni wióra i powierzchni natarcia sprawiają, że w pobliżu krawędzi skrawającej występuje ich zatarcie. Strefa zatarcia ma przy tym większy wymiar niż grubość warstwy skrawanej  $h$ . Dopiero znacznie dalej od krawędzi, gdzie siły normalne są mniejsze, występuje „zwyczajne” tarcie wióra o powierzchnię natarcia, czyli strefa poślizgu. Połączenie wióra z narzędziem w strefie zatarcia jest bardzo silne, silniejsze niż sam materiał obrabiany. Dlatego napierający powyżej materiał powoduje ścinanie materiału wióra w tzw. strefie wtórnego ścinania znajdującej się nad strefą zatarcia. Odkształcenia są w niej bardzo duże, znacznie większe niż w strefie ścinania. O ile w strefie ścinania występowało wyraźne zniekształcenie ziaren, o tyle w strefie ścinania wtórnego ziarna w ogóle zanikają. Materiał zachowuje się w niej raczej jak ciecz o bardzo dużej lepkości niż ciało stałe, dlatego strefa ta bywa także nazywana strefą płynięcia. Prędkość przemieszczania się materiału wzdłuż powierzchni natarcia płynnie zmienia się od zera w strefie zatarcia do pełnej prędkości wióra.

### 5.1.2. Narost

W pewnych warunkach skrawania odkształcany plastycznie materiał *wióra* nawarstwia się na powierzchni natarcia w strefie zatarcia tworząc narost. Strefa wtórnego ścinania przemieszcza się wtedy na górną powierzchnię narostu. Choć narost jest chemicznie tożsamy z materiałem obrabianym, to jego właściwości fizyczne są zupełnie inne — ma strukturę warstwową, bardzo silnie zgniecioną. Przy obróbce stali są to wydłużone ziarna ferrytu z bardzo rozdrobnionym cementytem, a twardość narostu może osiągać nawet 650 HV, przez co skutecznie opiera się on naciskom występującym w strefie skrawania. Wzrost prędkości

skrawania czy posuwu (grubości warstwy skrawanej) pociąga za sobą wzrost temperatury skrawania i przechodzenie od narostu do strefy płynięcia. Narost występuje więc w sprzyjającym mu zakresie temperatur i sił skrawania związanym z prędkością skrawania i posuwem. Powoduje on sztuczne zwiększenie kąta natarcia oraz skrócenie strefy zatarcia i całkowitej długości styku wióra z powierzchnią natarcia, a co za tym idzie obniżenie wartości sił skrawania. Powstawanie narostu jest jednak zjawiskiem niekorzystnym, ponieważ jest on z reguły niestabilny. Jego odrywające się fragmenty niszczą powierzchnię obrobioną i samo narzędzie oraz pogarszają dokładność obróbki.

### 5.1.3. Spęcznie wióra

Ważnym parametrem procesu skrawania, charakteryzującym wielkość odkształceń w strefie ścinania jest **kąt ścinania**  $\phi$  zawarty między kierunkiem prędkości skrawania a strefą ścinania. Im jest on mniejszy, tym większa jest długość strefy ścinania, a więc i odkształcenia w strefie ścinania. Pomiar tego kąta jest bardzo trudny i kosztowny. Kąt ścinania wpływa na grubość wióra  $h_{ch}$ . Stosunek tej grubości do grubości warstwy skrawanej zwany jest **współczynnikiem spęczenia wióra**  $\Lambda_h$ .

$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} \quad (12.1)$$

Grubość wióra jest trudna do zmierzenia, ze względu na bardzo nierówną powierzchnię zewnętrzną. Stosunkowo łatwo natomiast można zmierzyć długość wióra  $l_{ch}$  oraz, oczywiście, jego ciężar  $G_{ch}$ . Mnożąc licznik i mianownik prawej strony równania przez szerokość warstwy skrawanej  $b$ , długość zmierzonego wióra  $l_{ch}$  oraz ciężar właściwy materiału obrabianego  $\rho$  otrzymamy

$$\Lambda_h = \frac{h_{ch} b l_{ch} \rho}{h b l_{ch} \rho} = \frac{G_{ch}}{h b l_{ch} \rho} \quad (12.2)$$

Jest to wzór „operacyjny”, czyli taki, w którym występują jedynie wielkości możliwe do bezpośredniego zmierzenia. Należy podkreślić, że wzór ten jest słuszny dla skrawania swobodnego przy grubości warstwy skrawanej znacznie mniejszej od jej szerokości. Można go stosować jako przybliżony dla skrawania nieswobodnego przy prostoliniowej krawędzi skrawającej, małym promieniu naroża ( $r_e \ll$ ) oraz  $h \ll b$ .

Współczynnik spęczenia wióra może być wykorzystywany bezpośrednio albo służyć do wyznaczenia kąta ścinania. Zauważmy, że długość strefy ścinania  $l_{sh}$  (12.3) jest przeciwprostokątną  $AB$  dwóch trójkątów:  $ABC$  i  $ABD$  (rys. 12.2).

$$l_{sh} = \frac{h}{\sin \phi} = \frac{h_{ch}}{\cos(\phi - \gamma_0)} \quad (12.3)$$

Wyznaczając z równania (12.1)  $A_h$  oraz pamiętając o zależności (12.4),

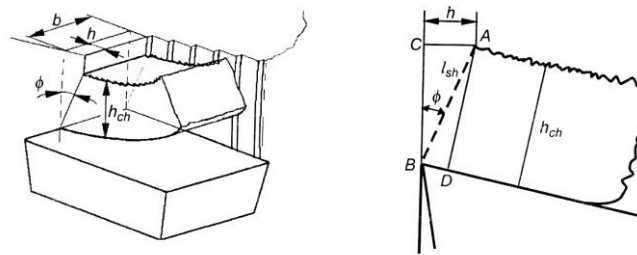
$$\cos(\phi - \gamma_0) = \sin \phi \sin \gamma_0 + \cos \phi \cos \gamma_0 \quad (12.4)$$

otrzymujemy:

$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} = \sin \gamma_0 + \frac{1}{\operatorname{tg} \phi} \cos \gamma_0 \quad (12.5)$$

co można przekształcić w poszukiwaną zależność kąta ścinania od współczynnika spęczenia wióra:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma_0}{\Lambda_h - \sin \gamma_0} \quad (12.6)$$



Rys. 12.2. Kąt ścinania i współczynnik spęczenia wióra wg [5]

#### 5.1.4. Wióry

Wióry są materiałem odpadowym. Postać wióra wynika ze zjawisk zachodzących w strefie skrawania, ma więc istotny wpływ na proces skrawania i jego wyniki. Ponadto, wiór może zajmować wielokrotnie większą objętość niż materiał, z którego powstał, oraz może być trudny do usunięcia ze strefy obróbki, oplątując narzędzie czy przedmiot obrabiany i rysując powierzchnię obrabianą.



















Można wyróżnić trzy zasadnicze postaci wiórów, tab.12.1:

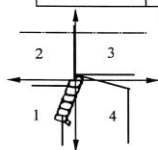
- Wiór elementowy (odpryskowy) występujący przy obróbce materiałów kruchych, jak żeliwo szare. Materiał ulega pękaniu wzdłuż powierzchni pękania (łupania), która tu zastępuje powierzchnię ścinania. Powstawaniu takiego wióra towarzyszą znaczne zakłócenia siły skrawania. Trudno jest uzyskać dobrą gładkość powierzchni. Wióry takie zajmują niewiele miejsca i łatwo opuszczają strefę obróbki.

• Wiór schodkowy (segmentowy) występuje przy obróbce materiałów twardych o słabej przewodności cieplnej, jak stale wysokostopowe lub stopy tytanu. Wysoka wytrzymałość materiału powoduje, że ścinanie następuje gwałtownie w zlokalizowanych płaszczyznach, bez wymiany ciepła z otoczeniem (adiabaticznie), a więc przy temperaturach na tyle wysokich, że następuje mięknięcie materiału. Struktura wióra poza tymi płaszczyznami jest praktycznie taka sama jak materiału obrabianego. Powstawaniu wióra schodkowego towarzyszą duże wahania sił skrawania.

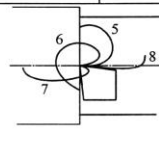
• Wióry ciągłe (jednolite) powstają przy skrawaniu materiałów plastycznych o niższej granicy plastyczności, jak stal, miedź czy aluminium. Narastanie naprężeń i odkształceń materiału obrabianego w strefie skrawania przebiega względnie płynnie, a struktura wióra jest zniekształconą przez ścinanie strukturą materiału obrabianego. Zmienność sił skrawania jest stosunkowo niewielka, a możliwa do uzyskania gładkość powierzchni najwyższa. Te wióry są najtrudniejsze do usunięcia i zajmują najwięcej miejsca.

Klasyfikacja wiórów wg PN-ISO 3685

1. Wstępowe <sup>1)</sup>	2. Rurkowe <sup>1)</sup>	3. Spiralne	4. Śrubowe otwarte <sup>1)</sup>	5. Śrubowe stożkowe <sup>1)</sup>	6. Łukowe <sup>2)</sup>	7. Elementowe	8. Iglowe
1.1 Długie 	2.1 Długie 	3.1 Płaskie 	4.1 Długie 	5.1 Długie 	6.1 Związane 		
1.2 Krótkie 	2.2 Krótkie 	3.2 Stożkowe 	4.2 Krótkie 	5.2 Krótkie 	6.2 Luźne 		
1.3 Splątane 	2.3 Splątane 		4.3 Splątane 	5.3 Splątane 			



<sup>1)</sup> dla wiórów 1,2,4 i 5 określa się kierunek spływu:  
1 – od przedmiotu, w kierunku posuwu,  
2 – do przedmiotu, w kierunku posuwu,  
3 – do przedmiotu przeciwnie do posuwu,  
4 – od przedmiotu przeciwnie do posuwu,



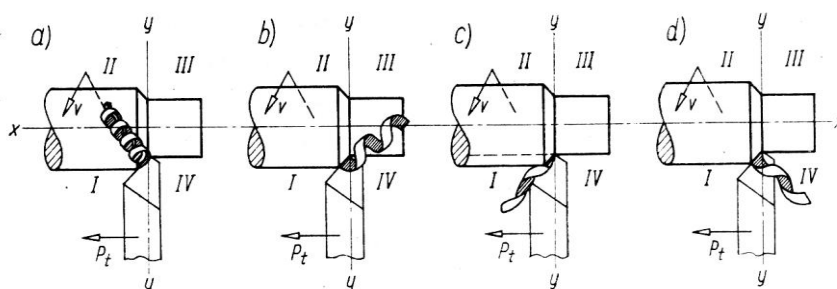
<sup>2)</sup> dla wiórów łukowych dodaje się trzecią cyfrę określającą miejsce łamania:  
5 – łamany o powierzchnię skrawania,  
6 – łamany o powierzchnię przyłożenia,  
7 – łamany o powierzchnię obrabianą,  
8 – łamany o powierzchnię obrobną.

Tab 12.1. Klasyfikacja wiórów wg PN-ISO 3685, wg [5]

### 5.1.5. Klasyfikacja kierunków biegu wiórów

W celu sklasyfikowania kierunku biegu wióra, oznaczono — w rzucie na płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny podstawowej — cztery ćwiartki przestrzeni. W związku z tym wyróżnia się bieg wióra:

- w ćwiartce II *nabiegający w przód*, tzn. w kierunku na przedmiot obrabiany i zgodnie z kierunkiem ruchu pomocniczego (rys. 12.3a),
- w ćwiartce III *nabiegający w tył*, tzn. w kierunku na przedmiot obrabiany i przeciwnie do kierunku ruchu pomocniczego (rys. 12.3b);
- w ćwiartce I *odbiegający w przód*, tj. od przedmiotu obrabianego i zgodnie z kierunkiem ruchu pomocniczego (rys. 12.3c),
- w ćwiartce IV *odbiegający w tył*, tzn. od przedmiotu obrabianego i przeciwnie do kierunku ruchu pomocniczego (rys. 12.3d).



Rys. 12.3. Kierunki splywu wióra: a) splyw wióra w ćwiartce II (nabiegający w przód) b) splyw wióra w ćwiartce III (nabiegający w tył), c) splyw wióra w ćwiartce I (odbiegający w przód), d) splyw wióra w ćwiartce IV (odbiegający w tył) wg [2]

Z punktu widzenia wygody i bezpieczeństwa pracy ocenia się wióry jako: *niepożądane* (1), *niedogodne* (2), *dopuszczalne* (3), *odpowiednie* (4) i *korzystne* (5). Na ocenę taką ma wpływ nie tylko kształt wióra, ale także kierunek jego biegu.

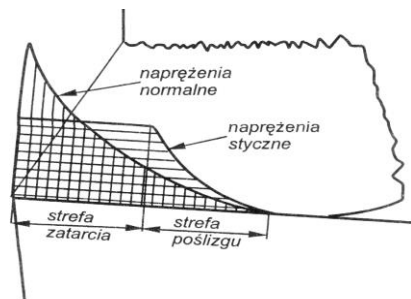
W związku z tym jako niepożądane ocenia się wióry nabiegające w tył, gdyż mogą powodować rysowanie obrobionej powierzchni, a w przypadku wiórów ciągłych mogą także powodować owijanie się dokoła przedmiotu obrabianego, co stwarza niebezpieczeństwo odrzutów siłą odśrodkową.

Niedogodne są wióry nabiegające w przód, gdyż wprawdzie nie rysują obrobionej powierzchni, ale stwarzają możliwość owijania się dokoła obrabianego przedmiotu.

Wióry odbiegające w przód lub w tył mogą być w zależności od kształtu dopuszczalne, odpowiednie lub korzystne. Tak np. za korzystne uważa się wióry śrubowe odcinkowe odbiegające w przód.

## 5.2. SIŁY SKRAWANIA

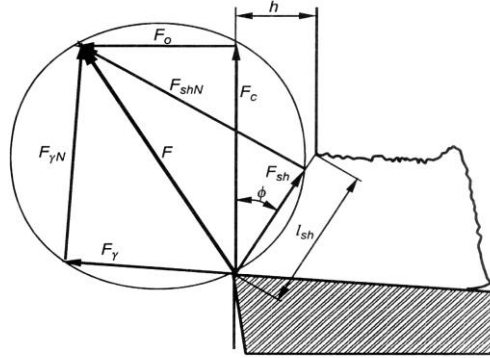
Na rys. 12.4 przedstawiono schematycznie rozkład naprężeń normalnych i stycznych na powierzchni natarcia przy skrawaniu swobodnym (w płaszczyźnie ortogonalnej). Naprężenia normalne, największe w pobliżu krawędzi skrawającej, maleją wykładniczo wraz z oddalaniem się od tej krawędzi. Naprężenia styczne są w przybliżeniu jednakowe wzdłuż strefy wtórnego ścinania, a następnie maleją wzdłuż strefy poślizgu. Można je umownie zastąpić siłami skupionymi na krawędzi skrawającej: styczną do powierzchni natarcia  $F_\gamma$  i normalną do powierzchni natarcia  $F_{\gamma N}$ . W sumie składają się one na wypadkową siłę skrawania  $F$ .



Rys. 12.4. Rozkład naprężeń na powierzchni natarcia wg [5]

Oddziaływanie narzędzia na wiór przenosi się na jego nasadę, czyli na powierzchnię ścinania, w której występują naprężenia ścinające i normalne. Te z kolei można umownie zastąpić skupioną siłą ścinania  $F_{sh}$  (styczną do powierzchni ścinania) i normalną do tej powierzchni  $F_{shN}$ . Oczywiście te siły również w sumie dają wypadkową siłę skrawania  $F$ . Obserwując oddziaływanie narzędzia na przedmiot obrabiany „z zewnątrz” czyli w układzie narzędzia, wygodnie jest rozłożyć wypadkową siłę skrawania  $F$  na siłę główną  $F_c$  działającą w kierunku prędkości skrawania i prostopadłą do niej oraz do płaszczyzny stycznej siłą ortogonalną  $F_o$ . Zauważmy, że kreśląc okrąg którego średnicą jest wektor

wypadkowej siły skrawania, łatwo możemy nanieść wszystkie trzy omówione rozkłady tej siły na prostopadłe do siebie składowe (rys 12.5).



Rys. 12.5. Rozkład sił w strefie skrawania wg [5]

### 5.3. PRACA SKRAWANIA

Na całkowitą pracę skrawania składają się:

- praca odkształcenia plastycznego  $E_{pc}$ .
- praca tarcia zewnętrznego  $E_f$
- praca tarcia wewnętrznego na skutek odkształceń sprężystych i drgań  $E_D$

Ostatni składnik pracy skrawania w normalnych warunkach obróbki bez drgań może być całkowicie pominięty wobec jego nieznaczącej wielkości w stosunku do dwóch pierwszych składników. Zatem praktycznie całkowitą pracę skrawania określa wzór:

$$E_{skr} \approx E_{pl} + E_t \quad (12.7)$$

Ponieważ praca tarcia zewnętrznego składa się z pracy tarcia na powierzchni natarcia  $E_m$  oraz pracy tarcia na powierzchni przyłożenia  $E_{tp}$  zatem

$$E_{skr} = E_{pl} + E_m + E_{tp} \quad (12.8)$$

Proces skrawania charakteryzować można *właściwą pracą skrawania* lub inaczej *jednostkową pracą skrawania*. Przez pracę właściwą skrawania rozumiemy ilość pracy potrzebnej do przetworzenia jednostki objętości lub masy warstwy skrawanej na wióry. Objętościowa praca właściwa skrawania  $e_v$  to ilość pracy niezbędna do przetworzenia  $1 \text{ mm}^3$  warstwy skrawanej na wióry. Wagowa praca



właściwa skrawania  $e_g$  to ilość pracy niezbędna do przetworzenia 1 g warstwy skrawanej na wióry.

#### 5.4. MOC SKRAWANIA

Istotną wielkością w procesie skrawania jest moc skrawania. Jest ona iloczynem siły skrawania i prędkości skrawania (12.9). Bierze się tu pod uwagę jedynie główną siłę skrawania i nominalną prędkość skrawania, ponieważ prędkość posuwu jest znacznie mniejsza i moc związana z posuwem może być pominięta. Uwzględniając sprawność układu napędowego oznaczoną przez  $\eta$  możemy potrzebną moc silnika  $P_s$  wyznaczyć ze wzoru (12.10):

$$P_e = \frac{F_c v_c}{60} \quad (12.9)$$

$$P_s = \frac{P_e}{\eta} \quad \text{czyli} \quad P_s = \frac{F_c v_c}{60 \cdot \eta} \quad (12.10)$$

Chcąc skorzystać z oporu właściwego skrawania przy obliczaniu mocy należy wyznaczyć grubość i szerokość warstwy skrawanej, a następnie zastosować zależność (12.11):

$$P_s = \frac{k_c b h v_c}{60 \cdot \eta} \quad (12.11)$$

## PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

Zależności:	wzory
<b>Współczynnik speczenia wióra: zgrubienia, rozszerzenia, skrócenia</b>	$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h}; \quad \Lambda_b = \frac{b_{ch}}{b}; \quad \Lambda_l = \frac{l}{l_{ch}}$
<b>Średni kąt poślizgu:</b>	$tg \phi = \frac{\cos \gamma_0}{\Lambda_h - \sin \gamma_0}$
<b>Prędkość splywu wióra:</b>	$v_{ch} = \frac{v_c \sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_0)} = \frac{v_c}{\Lambda_h} \quad [\text{m/min}]$
<b>Prędkość poślizgu:</b>	$v_s = v_c \frac{\cos \gamma_0}{\cos(\phi - \gamma_0)} \quad [\text{m/min}]$
<b>Efektywna moc skrawania:</b>	$P_e = P_c + P_f \quad [\text{W}]$ $P_e = \frac{F_c v_c}{60} + \frac{F_f v_f}{60000} \quad [\text{W}]$ gdzie: $v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad [\text{m/min}]; \quad n \text{ [obr/min]};$ $d \text{ [mm]}$ $v_f = f \cdot n \quad [\text{mm/min}]$
<b>Współczynnik wykorzystania mocy silnika obrabiarki:</b>	$\varepsilon = \frac{P_{sw}}{P_{sd}}; \quad P_{sw} - \text{wymagana moc silnika}$ $P_{sd} - \text{dysponowana moc}$ silnika
<b>Współczynnik sprawności</b>	$\eta = \frac{P_e}{P_s}; \quad P_s - \text{moc silnika}$
<b>Objętościowa praca skrawania:</b>	$e_v = \frac{F_c}{f a_p} \quad [\text{J/mm}^2] = k_c \quad [\text{N/mm}^2]$
<b>Wskaźnik energochłonności:</b>	$e_N = \frac{P_e}{Q_v} = \frac{P_e}{1000 a_p f v_c} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{mm}^3 / \text{min}} \right]$

**Literatura:**

- [1] Poradnik Inżyniera „Obróbka skrawaniem” t.I, WNT, W-wa 1991.
- [2] Jan Kaczmarek „Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej”, WNT, W-wa 1970.
- [3] Jerzy Dmochowski „Podstawy obróbki skrawaniem”, PWN, W-wa 1978.
- [4] Wit Grzesik „Podstawy skrawania materiałów metalowych”, WNT, W-wa 1998.
- [5] Krzysztof Jemielniak „Obróbka skrawaniem”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, W-wa 1998.